

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ И МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Султанов М.М.

Филиал «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Волжском, Россия

Резюме: *ЦЕЛЬ:* В статье представлены результаты разработки методологии проектного расчета надежности и изменения уровня надежности энергетических систем с учетом влияния управляющих воздействий на основе статистических методов сбора, анализа и моделей обработки опытных данных. *МЕТОДЫ:* При расчетной оценке применен системный анализ и обобщение экспериментальных данных по технологическим отказам основного оборудования тепловых электрических станций. *РЕЗУЛЬТАТЫ:* Предложена целевая функция управления параметрами надежности энергетического оборудования ТЭС. Выполнена апробация представленной целевой функции управления, которая показала адекватность полученных результатов по оценке надежности основных узлов и элементов энергетического оборудования ТЭС. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ:* Результаты проведенных исследований показывают, что при определении показателей надежности необходимо учитывать фактическое техническое состояние отдельных элементов и ресурсопределяющих функциональных узлов энергетического оборудования ТЭС. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методики оценивания управляющих воздействий для расчета выходных параметров управления и математической модели изменения выходных характеристик паровых турбин ТЭС по показателям выработки тепловой и электрической энергии, а также на стадии разработки проектно-конструкторской документации создания конструктивных элементов и практических рекомендаций с целью продления сроков эксплуатации энергетического оборудования генерирующих систем на базе цифровых технологий.

Ключевые слова: тепловые электрические станции; надежность; фактическое техническое состояние; вероятность безотказной работы; цифровые технологии.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания Российской Федерации FSWF- 2020-0025 “Разработка методов и анализ способов достижения высокого уровня безопасности и конкурентоспособности объектов энергетических систем на базе цифровых технологий”.

Для цитирования: Султанов М.М. Модель оценки технико-экономических показателей оффшорных ветроэлектростанций // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 5. С. 46-55. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-46-55.

DEVELOPMENT OF METHODOLOGY AND MEASURES TO ENSURE THE RELIABILITY OF ENERGY SYSTEMS EQUIPMENT

MM. Sultanov

Volzhsy Branch of the National Research University
«Moscow Power Engineering Institute», Russia

Abstract: *THE PURPOSE:* The article presents the results of the development of a methodology for the design calculation of reliability and changes in the level of reliability of energy systems, taking into account the influence of control actions based on statistical methods of collection, analysis and models of experimental data processing. *METHODS:* The system analysis and generalization of experimental data on technological failures of the main equipment of thermal power plants were used in the calculation assessment. *RESULTS:* The objective function of

controlling the reliability parameters of the thermal power plant power equipment is proposed. The approbation of the presented objective control function was performed, which showed the adequacy of the results obtained to assess the reliability of the main nodes and elements of the TPP power equipment. CONCLUSION: The results of the conducted studies show that when determining reliability indicators, it is necessary to take into account the actual technical condition of individual elements and resource-determining functional units of thermal power plant power equipment. The results obtained can be used to develop a methodology for evaluating control actions for calculating the output control parameters and a mathematical model for changing the output characteristics of TPP steam turbines in terms of heat and electric energy generation, as well as at the stage of developing design documentation for the creation of structural elements and practical recommendations in order to extend the service life of power equipment generating systems based on digital technologies.

Keywords: *thermal power plants; reliability; actual technical condition; probability of trouble-free operation; digital technologies.*

Acknowledgments: *This work was carried out with the financial support of the state assignment of the Russian Federation FSWF-2020-0025 "Development of methods and analysis of ways to achieve a high level of safety and competitiveness of objects of energy systems based on digital technologies."*

For citation: Sultanov MM. Development of methodology and measures to ensure the reliability of energy systems equipment. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(5): 46-55. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-46-55.

Введение

Надежность любого объекта определяется способностью технической системы выполнять определенные требуемые функции в заданных условиях эксплуатации в течение конкретного периода времени без сбоев в работе технологического цикла. Исследования надежности тепловых электростанций могут проводиться отдельно или в сочетании работы функциональных подсистем. Анализ надежности является стандартным инструментом для проектирования, технического обслуживания и эксплуатации любого функционального узла. В связи с этим имеется возможность производить оценку показателей надежности с помощью вероятностного подхода. Основной фундаментальной проблемой в анализе надежности является неопределенность в возникновении и последствиях отказов [1 – 3].

Надежность имеет несколько значений: вероятностное и детерминированное. Вероятностный подход основан на статистическом моделировании сбоев без детализации причин. Детерминированный подход выявляет причину выхода из строя подсистемы с возможностью дальнейшего предотвращения повторного сбоя.

В качестве основы для системного подхода, используемого для разработки модели оценки индекса надежности для тепловых электростанций применяют анализ графа. При этом система разделена на подсистемы с последующим представлением результатов по каждому элементу и их взаимодействию. Эти соединения создают метод, который можно использовать для определения стратегии технического обслуживания, и позволяющий установить границы надежности электростанции. Изучение надежности сложных систем, особенно, таких как тепловые электростанции, представляют огромный интерес для энергетических компаний. Прежде всего это связано с минимизацией эксплуатационных расходов и снижению финансовых затрат, обеспечивая при этом безопасность, надежность и оставаясь конкурентоспособными на рынке энергоресурсов. Отметим, что в условиях цифровизации энергетических систем требуется новый подход к оценке и повышению надежности и безопасности работы генерирующего оборудования на всех этапах жизненного цикла [4 – 8].

Отсутствие единой системы прогнозирования выхода из строя элементов энергетического оборудования электростанций при случайном характере возникновения дефектов приводит к снижению надежной и безопасной работы оборудования в целом. Определение фактического технического состояния основного и вспомогательного конкретного оборудования или всей энергетической установки определяется техническим состоянием элементов оборудования. Определение остаточного ресурса, возможно, оценить с помощью статистических методов. Статистика повреждаемости при оценке показателей безотказной работы различных функциональных узлов играет важную роль в управлении

надежностью котельного оборудования, направленная на достижение требуемого уровня надежности работы наиболее повреждаемых отдельных элементов и ресурсопределяющих функциональных узлов основного оборудования электростанций и энергетических систем [9 – 12].

Материалы и методы

Методика расчета и достижения требуемого уровня надежности с учетом вышеприведенных факторов, предложенная автором, представляет собой замкнутый цикл, изображенный на рисунке 1.

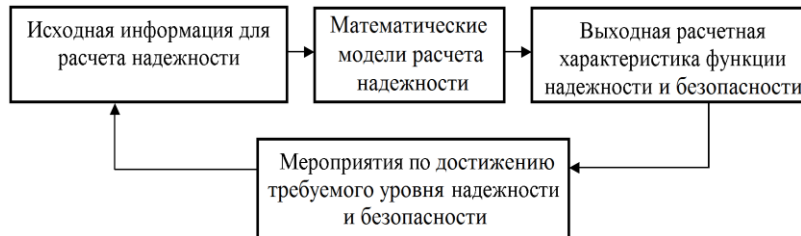


Рис.1. Методика расчета и достижения требуемого уровня надежности и безопасности Fig. 1. Methodology for calculating and achieving the required level of reliability and safety

Статистическая модель расчета надежности с учетом управляющих воздействий основывается на следующих допущениях и предпосылках [9 – 11, 13 – 15]:

- Расчет показателей надежности осуществляется в соответствии с конструкторской документацией;
- Рассматриваются элементы энергетического оборудования, имеющие серийное производство;
- В случае недостижения требуемого уровня или другой технической характеристики и выявления причины отказа проводят конструктивные изменения (доработку);
- Конструктивные изменения (доработка) изделия носят комплексный характер, то есть конструктивно изменяется не только элемент, причина отказа которого выявлена, но и другие элементы конструкции, непосредственно связанные между собой функциональной зависимостью при выполнении функциональным узлом (изделием) поставленной задачи.

Следует иметь в виду, что изменения конструктивных параметров дорабатываемых элементов связаны корреляционной зависимостью с элементом, причина отказа которого известна, и непосредственно влияют на выходную характеристику этого элемента и тем самым косвенно влияют на выходную характеристику изделия в целом.

Обсуждение результатов

Корреляционную зависимость дорабатываемых параметров представляют в виде зависимости:

$$y_i = b_{i1}u_1(t) + b_{i2}u_2(t) + \dots + b_{im}u_m(t), \quad (1)$$

где $y_i(t)$ – выходная характеристика элемента или изделия в момент проведения i -й доработки.

Обозначим $b_{ij} = b_{ijk}$, где b_{ijk} – коэффициент корреляции между j -м и k -м элементами (параметрами) в момент проведения i -й доработки.

Коэффициенты корреляции находят из соотношений вида:

$$b_{ijk} = \frac{M_{ijk}}{\sigma_{ij}\sigma_{ik}}; \quad (2)$$

$$M_{ijk} = \frac{\sum_{i=1}^n (u_{ij} - \bar{u}_j)(u_{ik} - \bar{u}_k)}{n-1}; \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_{ij} - \bar{u}_j)^2}{n-1}}; \quad (4)$$

$$\sigma_{ik} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_{ik} - \bar{u}_k)^2}{n-1}}, \quad (5)$$

где M_{ijk} – математическое ожидание; σ_{ij} и σ_{ik} – среднеквадратические отклонения параметров управления ij -го и ik -го элементов; u_{ij} и u_{ik} – текущие значения параметров управления ij -го и ik -го элементов; u_j и u_k – средние значения параметров управления j -го и k -го элементов; $i = 1, 2, \dots, n$; $j, k = 1, 2, \dots, m$.

Параметры управления u_{ij} могут быть представлены в виде функций самих управлений, производных от функций управлений, вторых производных от функций управлений и т. д. Таким образом, имея результаты проектирования и отработки изделия-аналога, можно построить функциональные зависимости и корреляционные связи, отражающие изменения конструктивных параметров, а также их влияние на выходные характеристики элементов или изделия в целом. При проектировании и отработке нового изделия, когда статистические данные отсутствуют, функциональные зависимости и корреляционные связи определяют расчетами. Принятые допущения и предпосылки позволяют при разработке математической модели применять аппарат на основе матричных исчислений. Необходимость матричного подхода отпала бы, если бы каждое управление u_i влияло только на одну характеристику y_i . В этом случае матрица в управлении была бы диагональной и матричный подход не позволил бы ничего нового по сравнению со скалярными моделями, записываемыми для каждой характеристики отдельно.

Однако управление u_i , направленное на выходную характеристику y_i , в силу специфики обрабатываемой системы оказывает косвенное влияние и на другие характеристики, то есть осуществляется косвенное управление ими. Степень косвенного влияния определяется коэффициентами b_{ij} , поэтому матрица не является диагональной, и необходим матричный подход, который определяет зависимость выходных характеристик от входных. Все элементы матрицы, расположенные на диагонали, непосредственно влияют на управление выходной характеристикой системы, а внедиагональные элементы матрицы отражают косвенное влияние управления на другие параметры и соответственно выходную характеристику системы в целом.

Частным случаем косвенного управления является доработка элемента без изменения параметра управления других элементов. В этом случае изменение параметра управления при доработке оказывает непосредственное влияние на выходную характеристику дорабатываемого элемента, и соответственно – выходную характеристику системы (изделия). Этот случай аналогичен использованию диагональной матрицы, когда изменение параметра управления влияет только на выходные характеристики дорабатываемого элемента и изделия. Таким образом, математическая модель процесса отработки сложной технической системы основывается на матричном подходе к нахождению выходных характеристик создаваемого изделия посредством изменения конструктивных, технологических и других параметров управления, выраженных в явном виде.

При таком подходе к решению задачи можно получить систему линейных уравнений, обеспечивающих нахождение управляющих воздействий в явном виде. Модель отработки представим в виде системы, имеющей вход, выход и характеризующее техническое состояние, рисунок 2.

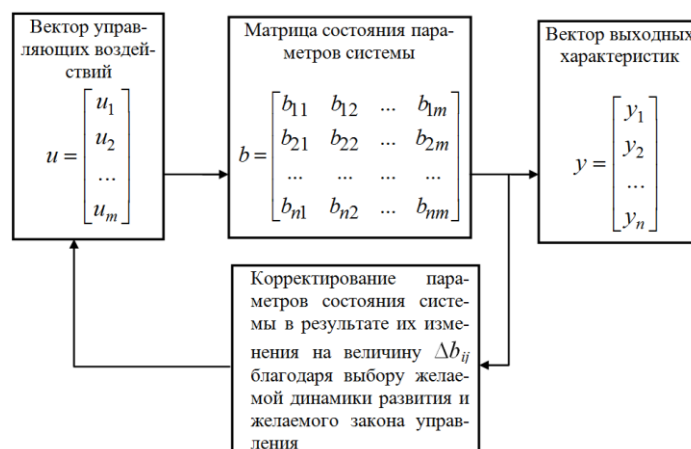


Рис.2. Модель обработки системы

Fig. 2. System processing model

Рассмотрим случай, когда выходная характеристика выражается изменением наработки на отказ, являющийся соотношением вида

$$y_i(t) = T_i^{mp}(t) - T_i(t), \quad (6)$$

где $T_i^{mp}(t)$ – требуемое значение наработки на отказ i -го элемента;

$T_i(t)$ – текущее значение наработки на отказ i -го элемента к моменту времени t .

Основная задача процесса доработок состоит в том, чтобы обеспечить рост величин $T_i(t)$, а значит, приблизить к нулю значение функции (6). Уравнение, характеризующее такое изменение во времени запишем в виде:

$$\frac{dy(t)}{dt} = -Dy. \quad (7)$$

Примем

$$y = e^{-Dt} y^0. \quad (8)$$

где e^{-Dt} – матричная экспонента;

y^0 – вектор начального состояния выходной характеристики изделия (системы);

$$e^{-Dt} = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{D^k}{k!} t^k; \quad y^0 = \begin{bmatrix} y_1^0 \\ y_2^0 \\ \dots \\ y_m^0 \end{bmatrix}.$$

Для простоты предположим, что D – диагональная матрица, то есть

$$D = \begin{bmatrix} \lambda_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_0 \end{bmatrix},$$

где λ_i – постоянные.

При таком выборе матрицы D из уравнения (8) следует

$$y_i(t) = e^{-\lambda_i t} y_i^0. \quad (9)$$

Пусть t_0 – заданный срок отработки. Изменение выходной характеристики в процессе отработки показано на рисунке 3.

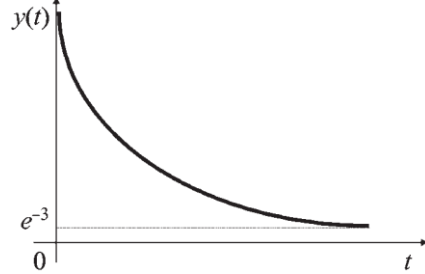


Рис. 3 Желаемая динамика изменения выходной характеристики

Fig. 3 Desired dynamics of the output characteristic change

Такое допущение позволяет предположить, что

$$D = \frac{3}{t_0} I, \quad (10)$$

где I – единичная матрица;

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}.$$

На основании практики отработки сложных систем можно предположить, что время отработки для всех исполнительных механизмов одинаково, то есть $t_i = t_0$. В этом случае выходная характеристика изделия упрощается и принимает вид

$$y(t) = e^{-\frac{t}{t_0}} y^0. \quad (11)$$

Анализ уравнений (9) и (10) показывает, что эти формулы определяют заданные условия изменения выходной характеристики изделия вида $y(t) = T^{\text{np}}(t) - T(t)$, в этом случае желаемый закон управления имеет вид:

$$Bu(t) = t \int_0^t y(\tau) d\tau. \quad (12)$$

где B — постоянная в желаемом законе управления, которую находят из опытных данных;

τ – переменная интегрирования.

Равносильная форма записи

$$B \frac{du(t)}{dt} = y(t), \quad (13)$$

где $u(t = 0) = 0$.

Переходя от скалярного случая к векторному, когда управление является векторной функцией времени, имеем

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \dots \\ u_m(t) \end{bmatrix}$$

и аналогично выходная характеристика представляет собой вектор

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_n(t) \end{bmatrix}.$$

Постоянная величина B в уравнении (13) является не числом, а матрицей, постоянной и определенной для некоторого одного момента времени, то есть

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nm} \end{bmatrix}.$$

где коэффициенты b_{ij} ($i = 1 \dots n, j = 1 \dots m$) (элементы матрицы) находят, используя опытные данные.

Тогда уравнение (13) в развернутом виде можно записать так:

$$\left. \begin{aligned} y_1(t) &= b_{11} \frac{du_1(t)}{dt} + b_{12} \frac{du_2(t)}{dt} + \dots + b_{1m} \frac{du_m(t)}{dt}; \\ y_2(t) &= b_{21} \frac{du_1(t)}{dt} + b_{22} \frac{du_2(t)}{dt} + \dots + b_{2m} \frac{du_m(t)}{dt}; \\ &\dots\dots\dots \\ y_n(t) &= b_{n1} \frac{du_1(t)}{dt} + b_{n2} \frac{du_2(t)}{dt} + \dots + b_{nm} \frac{du_m(t)}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Таким образом, желаемый закон управления, отображаемый уравнением (13), является уравнением неявного вида. Если в это уравнение подставить заданное значение вектора $y(t) = y_t^{mp}$, то полученное в результате уравнение примет вид

$$y_t^{mp} = B \frac{du(t)}{dt}, \quad (15)$$

где y_i^{TP} – требуемое значение выходной характеристики;

B – матрица состояния параметров управления при выполнении условия:

$$BB^+ y_t^{mp} = y_t^{mp}, \quad (16)$$

здесь B^+ – матрица, псевдообратная матрице B .

С учетом уравнения (15) и (16) получим выражение

$$\varepsilon = y_t^{mp} - B \frac{du(t)}{dt}$$

для которого сумма квадратов координат должна достигнуть наименьшего значения.

В соответствии с этим решение имеет вид

$$\frac{du(t)}{dt} = B^+ y_t^{mp}. \quad (17)$$

С учетом соотношений (8) и (13) и при введении в них обозначения $y^0 = y^{tp}$ получим

$$\frac{du(t)}{dt} = B^+ e^{-D\tau} y_t^{mp}. \quad (18)$$

Откуда

$$u(t) = u^0 + B^+ \int_0^t e^{-D\tau} y_t^{mp} d\tau, \quad (19)$$

где u^0 – начальный вектор управления.

Учитывая, что

$$\int_0^t e^{-D\tau} y_t^{mp} d\tau = \frac{1}{D} (1 - e^{-Dt}) y^{mp}, \quad (20)$$

получим

$$u(t) = u^0 + B^+ \frac{1}{D} (1 - e^{-Dt}) y^{mp}. \quad (21)$$

Преобразуем соотношения (20) и (21):

$$D^{-1} = \frac{t_0}{3} I; \quad (22)$$

$$(1 - e^{-Dt}) = (1 - e^{-DT}) I = (1 - e^{-\frac{3t}{t_0}}) I. \quad (23)$$

После подстановки (23) в выражение (21) имеем

$$u(t) = u^0 + \frac{t_0}{3} (1 - e^{-\frac{3t}{t_0}}) B^+ y^{mp}. \quad (24)$$

В общем виде при задании времени T отработки вектор управляющих воздействий

$$u(t) = u^0 + T(1 - e^{-\frac{t}{T}}) B^+ y^{mp}. \quad (25)$$

Развернутый вид этого вектора

$$\begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \dots \\ u_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1^0(t) \\ u_2^0(t) \\ \dots \\ u_m^0(t) \end{bmatrix} + T \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_1^{mp} \\ y_2^{mp} \\ \dots \\ y_n^{mp} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Из формулы (24) следует, что при $t = 0$ вектор управления $u(t) = u_0$, а при $t = t_0$:

$$u(t) \approx u^0 + \frac{t_0}{3} B^+ y^{mp}. \quad (27)$$

Таким образом, функция управления $u_i(t)$, характеризующая динамику изменения управляющих воздействий, представлена рисунком 4.

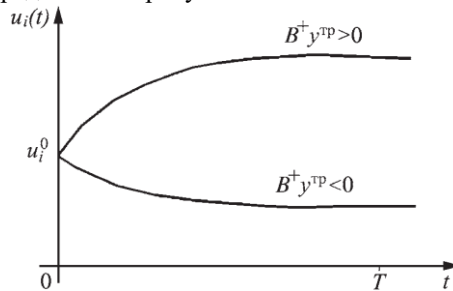


Рис. 4 Динамика изменения управляющих воздействий: T – заданный период отработки

Fig. 4 Dynamics of changes in control actions: T - the specified period of testing

Таким образом, закон управления выбирают исходя из практических соображений, а желаемую динамику выходной характеристики определяют, используя расчеты надежности этой характеристики в виде наработки на отказ, интенсивности отказов, вероятности безотказной работы и других параметров, представленной как изменение функции во

времени за заданный срок отработки. Полученные на основе расчетных данных параметры управления в случае их нереализуемости корректируют, проводя дополнительные расчеты при изменении соответствующих расчетных параметров или изменяя динамику выходной характеристики, а также корректируя срок отработки.

На этапе отработки, когда изделие проходит испытание или эксплуатируется и соответственно появляются отказы, роль конструктора сводится к следующему.

Составляют таблицу исходных данных в виде параметров состояния, значения которых получены как расчетами до проведения доработок, так и по опытным данным – отказам и наработкам на отказ исполнительных механизмов и изделия в целом на некоторый момент времени.

Результаты полученных данных позволяют прогнозировать изменение параметра потока отказов λ и коэффициента непланового ремонта $K_{н.р}$ при дальнейшей эксплуатации.

До проведения доработки корректируют параметры отказавшего элемента, а также элементов, связанных с отказавшими функциональной зависимостью и корреляционной связью. После чего с учетом выбранного закона управления и при условии превышения параметров управления над допустимыми, корректируют техническую документацию и продолжают испытания. Если после проведения испытаний доработанного узла или системы в объеме, равном тому же, который они прошли до доработки, отказ по данному виду доработки не возникает, то доработку считают эффективной. В случае если отказ по данному типу доработки повторяется, то отказавший элемент заменяют на конструктивно новый и процедуру испытаний повторяют.

Выводы

1. Разработана методология проектного расчета надежности и изменения уровня надежности энергетических систем, их ресурсопределяющих функциональных узлов основного оборудования и элементов с учетом влияния управляющих воздействий на основе статистических методов корреляционно-регрессионного анализа. Предложенная методология является основой для создания методики оценивания управляющих воздействий для расчета выходных параметров управления паровых турбин и математической модели изменения выходных характеристик паровых турбин ТЭЦ по показателям выработки тепловой и электрической энергии.

2. На основе обработки статистических данных по отказам ресурсопределяющих функциональных узлов основного оборудования и их элементов разработаны методики и модели оценки показателей надежности серийного энергетического оборудования ТЭС на всех этапах жизненного цикла.

3. Внедрение предложенной модели сбора, хранения и обработки данных о техническом состоянии энергетического оборудования и элементов на энергетических предприятиях позволит создать информационно-технологическую основу для реализации концепции цифровой трансформации, а также эффективного управления процессом для повышения надежности производства тепловой и электрической энергии.

4. Полученные в работе результаты также могут быть использованы на стадии проектирования конструктивных элементов и разработки практических рекомендаций с целью продления сроков эксплуатации генерирующих систем, а также совершенствования программ ремонтной деятельности энергетического оборудования по фактическому техническому состоянию на базе цифровых технологий.

Литература

1. Султанов М.М., Труханов В.М., Аракелян Э.К., Куликова М.А. Методы достижения и обеспечения высокого уровня надежности и безопасности энергетического оборудования ТЭС, ГЭС, АЭС на всех этапах жизненного цикла // Новое в российской электроэнергетике. 2018. № 3. С. 6-15.
2. Султанов М.М., Курьянова Е.В. Техно-экономическая оценка параметров тепловых схем ТЭС с водородным генератором // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 2. С. 46-55.
3. Arakelyan E.K., Boldyrev I.A., Evseev K.V., Gorban Y.A. Application of machine learning methods for optimizing the technical and economic performance of generating systems // В сборнике: The II «International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy». Conference proceedings. Voronezh, 2021. p. 12011.
4. Sultanov M.M., Trukhanov V.M., Gorban Y.A. High value heat-power equipment component test planning with time-series technique at single reliability level // В сборнике: Proceedings of the 2nd 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2020. 2020. p. 9059231.

5. Mangara BT. On some methods of reliability improvement of engineering systems. Bloemfontein, Free State, South Africa: University of the Free State; 2015 p. 155.
6. Mohan M, Gandhi OP, Agrawal VP. Real-time reliability index of a steam power plant. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Pt A: Journal of Power and Energy. 2008. V. 222. pp. 355–369.
7. Kalaba D.V., et al.: Determining the Teoretical Reliability function of Thermal Power. Thermalscience: Year 2014. V. 18, Suppl. 1, pp. PP. 229 – 238.
8. Arakelyan E.K., Boldyrev I.A., Gorban Y.A. TPP Generating unit technical and economic index accuracy increase // в сборнике: proceedings of the 2nd 2020 international youth conference on radio electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2020. 2020. pp. 9059234.
9. Гартунг Ю.А. Исследование развития динамических систем, обусловленного некоторыми дифференциальными программами. М.: Наука. 1984. 59 с.
10. Труханов В.М. Надежность в технике: монография. ... 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательский дом «Спектр», 2017. 656 с.
11. Труханов, В. М. Новый подход к обеспечению надежности сложных систем: монография. М.: Издательский дом «Спектр», 2010. 247 с.
12. Труханов, В. М., Тарнаев А. Г. Надежность и диагностика сложных систем: учебник / под общ. ред. В. М. Труханова. М.: Издательский дом «Спектр», 2016. 175 с.
13. Труханов В.М. Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытаний опытных образцов: монография. М.: Машиностроение, 2003. 320 с.
14. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Абдуллазянов А.Ф., и др. Цифровая система мониторинга повреждений на линиях электропередачи // Известия высших учебных заведений. проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 1. С. 146-155.
15. Бык Ф.Л., Какоша Ю.В., Мышкина Л.С. Фактор надежности при проектировании распределительной сети // Известия высших учебных заведений. проблемы энергетики. 2020. Т. 22. № 6. С. 43-54.

Автор публикации

Султанов Махсуд Мансурович – канд. техн. наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией Цифровых технологий филиала «Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: sultanov_mm@mail.ru.

References

1. Sultanov MM, Trukhanov VM, Arakelyan EK, et al. Metody dostizheniya i obespecheniya vysokogo urovnya nadezhnosti i bezopasnosti energeticheskogo oborudovaniya TES, GES, AES na vsex etapakh zhiznennogo tsikla. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike*. 2018;3:6-15.
2. Sultanov MM, Kur'yanova EV. Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka parametrov teplovykh skhem TES s vodorodnym generatorom. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2021;23(2):46-55.
3. Arakelyan EK, Boldyrev IA, Evseev KV. Application of machine learning methods for optimizing the technical and economic performance of generating systems. The II «International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy». Conference proceedings. Voronezh, 2021. p. 12011.
4. Sultanov MM, Trukhanov VM, Gorban YA. *High value heat-power equipment component test planning with time-series technique at single reliability level*. Proceedings of the 2nd 2020 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2020. 2020. p. 9059231.
5. Mangara BT. On some methods of reliability improvement of engineering systems. Bloemfontein. Free State, South Africa: University of the Free State; 2015 p. 155.
6. Mohan M, Gandhi OP, Agrawal VP. Real-time reliability index of a steam power plant. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: *Journal of Power and Energy*. 2008; 222:355–369.
7. Kalaba DV, et al. *Determining the Teoretical Reliability function of Thermal Power*. Thermalscience: Year 2014;18(1):229-238.

8. Arakelyan EK, Boldyrev IA, Gorban YA. TPP Generating unit technical and economic index accuracy increase. Proceedings of the 2nd 2020 international youth conference on radio electronics. *Electrical and Power Engineering*. REEPE 2020. 2020. pp. 9059234.

9. Gartung YuA. *Issledovanie razvitiya dinamicheskikh sistem, obuslovlennogo nekotorymi differentsial'nymi programmami*. M.: Nauka, 1984. 59 P.

10. Trukhanov VM. *Nadezhnost' v tekhnike: monografiya*. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Izdatel'skii dom «Spektr». 2017. 656 P.

11. Trukhanov VM. *Novyi podkhod k obespecheniyu nadezhnosti slozhnykh sistem: monografiya*. M.: Izdatel'skii dom «Spektr». 2010. 247 P.

12. Trukhanov VM, Tarnaev AG. *Nadezhnost' i diagnostika slozhnykh sistem: pod obshch. red. V.M. Trukhanova*. M.: Izdatel'skii dom «Spektr», 2016. 175 P.

13. Trukhanov VM. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem tipa podvizhnykh ustanovok na etape proektirovaniya i ispytanii opytnykh obraztsov: monografiya*. M.: Mashinostroenie, 2003/ 320 P.

14. Fedotov AI, Vagapov GV, Abdullazyanov AF, et al. Tsifrovaya sistema monitoringa povrezhdenii na liniyakh elektroperedachi. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. problemy energetiki*. 2021;23(1):146-155.

15. Byk FL, Kakosha YuV, Myshkina LS. Faktor nadezhnosti pri proektirovanii raspredelitel'noi seti. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. problemy energetiki*. 2020;22(6):43 - 54.

Author of the publication

Mahsud M. Sultanov – Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI). E-mail: sultanov_mm@mail.ru.

Получено

20.10.2021г.

Отредактировано

27.10.2021г.

Принято

27.10.2021г.